

Simulations aux grandes échelles de panaches

D. Lamalle^{†a,b}, P. Carlotti^a, P. Salizzoni^b, R.J. Perkins^b

a. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Université Paris Est

b. Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509, Université de Lyon,
École Centrale de Lyon

Résumé :

Les simulations de type CFD (Computational Fluid Dynamics) sont de plus en plus utilisées lors des études de sécurité incendie et permettent de simuler la propagation des fumées dans des compartiments. Le présent article vise à améliorer notre compréhension des panaches et notre capacité à les modéliser avec des codes CFD afin de fournir des études de sécurité incendie plus sûres. Lors de ce travail, plusieurs grandeurs ont été analysées (profils de vitesse, flux de quantité de mouvement et masse, largeur du panache, entraînement, nombre de Richardson...) afin de mettre en avant le fait que les simulations ayant pour conditions de source une injection de fluide n'arrivent pas à développer de la turbulence en sortie de buse et également montrer que les panaches avec injection de fluide sont totalement différents des panaches avec une plaque chauffante (modèle de convection). Cet article présente également une méthode pour calculer l'entraînement d'air frais au sein du panache qui n'a, à la connaissance des auteurs, pas encore été étudiée.

Abstract :

CFD simulations are more and more used in fire safety studies and enable to simulate smoke propagation within compartments. This work aims at improving our knowledge on fire plumes and our ability to model them with CFD codes in order to provide safer fire safety studies. During this work several quantities have been analysed (such as W-velocity profiles, momentum and mass fluxes, plume width, entrainment, Richardson number...) in order to highlight the fact that simulations with a fluid injection as source conditions are not able to develop turbulence at the injector exit and also show that plumes generated by fluid injection are different of plume obtained by heat flux (convective model). This article presents also a method for calculating the entrainment which has not been studied up to now.

Mots clefs : Panache flottant; Fire Dynamics Simulator (FDS); Simulation aux grandes échelles (LES)

1 Introduction

Lors des études de sécurité incendie, la fumée est un des paramètres qui est pris en compte puisqu'elle est à l'origine d'une réduction de la visibilité, d'une augmentation du rayonnement émis et amplifie le risque d'intoxication par les produits de combustion pour les occupants d'un bâtiment. Étant donné que la fumée est formée à partir d'un panache flottant, il est important d'améliorer notre connaissance sur la dynamique et la physique des panaches et d'être capable de les reproduire par des codes numériques (simulations CFD). Parmi les grandeurs de panache qui sont mal connues, il y a notamment l'évolution avec la hauteur de l'entraînement et du nombre de Richardson local. Le présent article vise, par le biais de simulations numériques, à explorer ces grandeurs et présente également une nouvelle méthode pour calculer l'entraînement. Pour cela, on se base sur un cas mesuré expérimentalement et on utilise deux types de conditions de source, une injection d'air chaud et une source de chaleur surfacique (plaque chauffante). Une comparaison formelle avec le cas expérimental,

†. Toute correspondance doit-être adressée à D. Lamalle, E-mail : damien.lamalle@cstb.fr

qui suppose un post traitement spécifique des données expérimentales, sera exposée par ailleurs. La première section fixe les notations et présente le cas expérimental. La seconde section présente les cas simulés et procède à la comparaison des données brutes issues de ces simulations. Enfin, la troisième section pose les définitions employées pour l'entraînement et le nombre de Richardson local et les calcule à partir des simulations. La quatrième section est une discussion.

2 Notations et présentation du cas simulé

Dans cet article on considère un panache issu d'une surface localisée au sol, émis dans une atmosphère non stratifiée. On note z la hauteur au dessus du sol et, pour tout z , $w(z, r)$ la vitesse verticale en fonction de la hauteur et de la distance horizontale à l'axe issu du centre de la source. On note aussi $\rho(z, r)$ la masse volumique au même point. La masse volumique ambiante est notée ρ_a .

A partir de la vitesse et de la masse volumique, on définit les 3 flux réduits G , B et M qui permettent de caractériser entièrement le panache dans la théorie issue des travaux présentés dans [5] (en remplaçant le flux de volume par un flux de masse pour pouvoir l'analyser aux cas non Boussinesq, cf. [2]) :

$$G = \int \rho \cdot w \, dS \quad , \quad B = \int g \cdot \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a} \cdot w \, dS \quad , \quad M = \int \rho \cdot w^2 \, dS \quad . \quad (1)$$

Dans les équations ci-dessus, g est l'accélération de la gravité, et G , B et M sont respectivement les flux de masse, flottabilité et quantité de mouvement. Ces flux permettent de définir les grandeurs (vitesse, masse volumique et largeur) $W_H(z)$, $\rho_H(z)$ et $b_H(z)$ homogénéisées (top-hat en anglais) de la façon suivante :

$$G = \pi \rho_H W_H b_H^2 \quad , \quad B = \pi g \frac{\rho_a - \rho_H}{\rho_a} W_H b_H^2 \quad , \quad M = \pi \rho_H W_H^2 b_H^2 \quad . \quad (2)$$

Les flux de masse, flottabilité et quantité de mouvement à la source valent :

$$G = 9.3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \quad , \quad B = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^3 \quad , \quad M = 5.6 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m/s}^2 \quad . \quad (3)$$

Le cas simulé a été étudié expérimentalement par [4]. On en donne ici une brève présentation, et le lecteur est invité à se référer à [4] pour plus de détails. L'air chaud est injecté par une buse de 16.18 cm^2 de surface, insérée au centre d'un plan horizontal, à la température de $T = 120^\circ \text{C}$ et une vitesse de 0.6244 m/s , dans une atmosphère à $T = 20^\circ \text{C}$. L'écoulement à la source a un nombre de Reynolds qui vaut approximativement 1 400. Le plan horizontal représentant le sol mesure 1.5 m sur 1.5 m et les mesures sont réalisées jusqu'à une hauteur de 0.7 m . Les mesures utilisent la PIV (Particle Image Velocimetry) pour la vitesse et des thermocouples pour la température. Il importe de noter que la buse a une géométrie complexe, optimisée pour garantir une transition vers la turbulence bien reproductible.

3 Présentation des simulations et comparaison des résultats

Les simulations ont été réalisées en 3 dimensions (3D) avec le logiciel FDS (Fire Dynamics Simulator) dans sa version 5. Deux conditions de source ont été utilisées : d'une part, une injection de fluide à $T = 120^\circ \text{C}$, en respectant la surface de la source du cas expérimental et en fixant la vitesse afin de reproduire la flottabilité injectée dans le cas expérimental, et d'autre part un flux thermique réparti sur une plaque de surface égale à la source, en respectant là aussi la flottabilité introduite dans le cas expérimental. On utilise les étiquettes *Injection_X* pour les simulations ayant comme conditions à la source une injection d'air chaud et *Plaque_X* pour les simulations ayant une source de chaleur surfacique. Le X représentant le maillage utilisé lors des simulations. Les simulations sont pratiquées sur 3 maillages, avec des mailles cubiques de 10 mm, 8 mm et 5 mm, respectivement. Pour les figures, on utilise les étiquettes *A*, *B* et *C* pour repérer ces maillages, respectivement. Le domaine de calcul est identique à celui de l'expérience, c'est à dire un sol de 1.5 m par 1.5 m et une hauteur de 0.7 m . Les autres conditions aux limites sont une paroi pour le sol et des conditions « OPEN » pour les

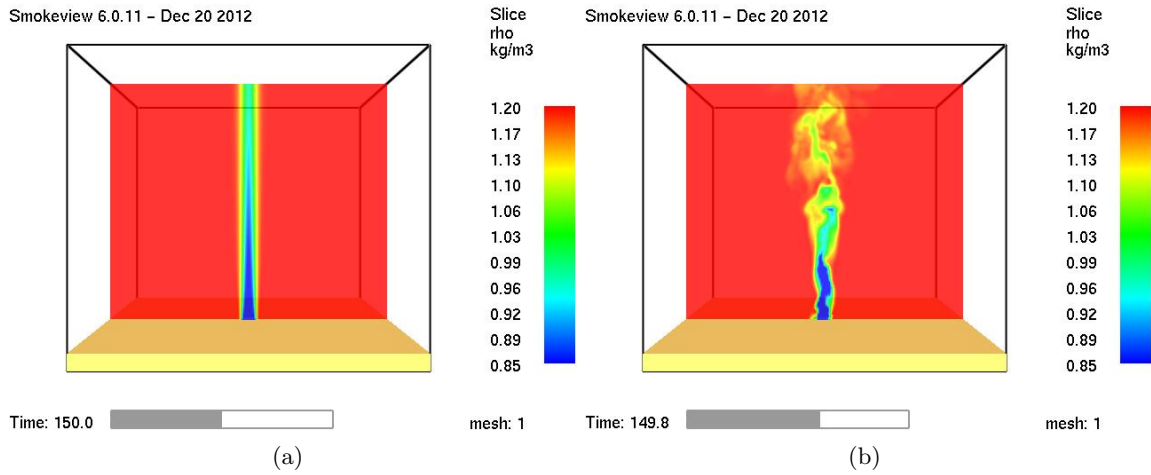


FIGURE 1 – Coupes verticales de masse volumique instantanée au bout de 150 secondes de simulation pour les cas (a) InjectionC et (b) PlaqueC.

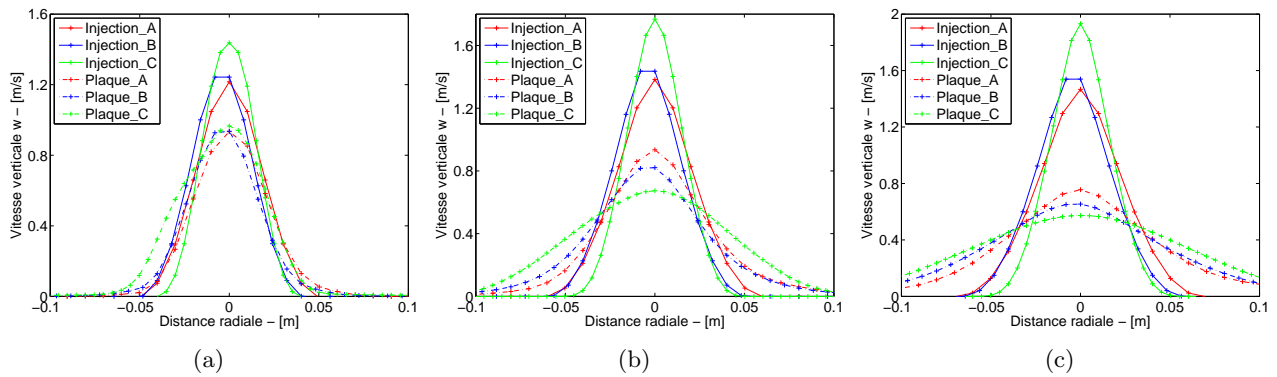


FIGURE 2 – Comparaison inter-simulations des profils de la vitesse verticale W aux hauteurs de (a) $0.20m$, (b) $0.40m$ et (c) $0.60m$.

surfaces latérales et supérieure. Chaque cas a été simulé pendant un temps physique de 300 secondes, et l'écoulement statistiquement permanent a toujours été atteint en moins de 50 secondes. Ainsi les moyennes temporelles sont prises sur la période de 250 secondes qui suit.

La visualisation des champs de masse volumique (voir figure 1) montre immédiatement que les conditions de source influent profondément sur la dynamique du panache : la source avec injection n'arrive pas à développer de la turbulence en sortie de buse alors que la source avec la plaque chauffante y arrive très bien. Ceci a une conséquence visible sur l'étalement du panache. Ce point se voit très bien en traçant les profils de vitesse verticale à plusieurs hauteurs (voir figure 2) et l'évolution de la largeur du panache (voir figure 4(c)). On voit en particulier que la vitesse maximale à $0.60m$ de hauteur est bien plus importante pour les simulations avec l'injection que les simulations avec la plaque chauffante. Cependant, la largeur du panache est plus importante pour les simulations avec la plaque chauffante que les simulations avec l'injection d'air.

Enfin, les simulations permettent de comparer les flux M et G en fonction de la hauteur (B étant fixé par les conditions aux limites, cf. ci-dessus). La figure 3 donne l'évolution des flux M et G en fonction de la hauteur pour les six simulations. Les flux de quantité de mouvement quelque soit les conditions de source sont plutôt similaires. Ce n'est pourtant pas le cas des flux de masse qui augmentent avec la hauteur beaucoup plus pour les simulations avec la plaque chauffante que les simulations avec l'injection.

Enfin, la figure 4 donne les grandeurs homogénéisées recalculées à partir des flux en fonction de la hauteur. On voit sur la figure 4(b) que l'évolution de la masse volumique en fonction de la hauteur pour

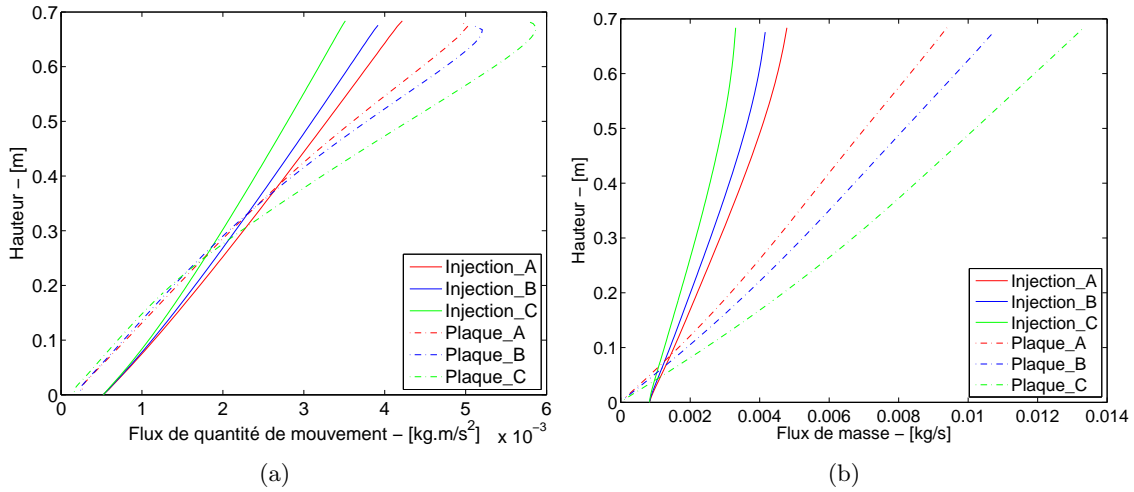


FIGURE 3 – Évolution des flux de (a) quantité de mouvement et (b) masse en fonction de la hauteur.

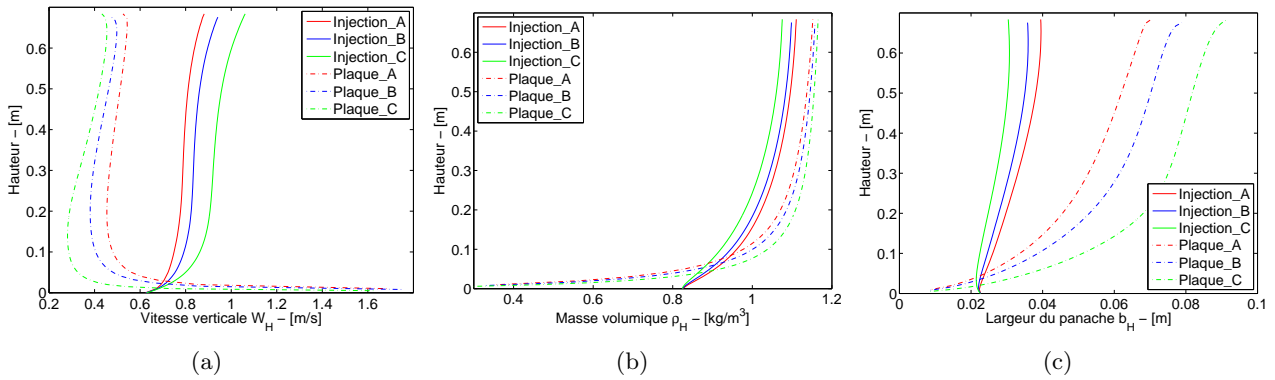


FIGURE 4 – Comparaison inter-simulations de la (a) vitesse verticale homogénéisée W_H , (b) masse volumique homogénéisée ρ_H et (c) largeur du panache homogénéisée b_H en fonction de la hauteur.

les cas de la plaque chauffante et de l'injection sont plutôt comparables contrairement aux figures 4(a) et 4(c) qui confirment l'existence de deux familles de simulations : celles avec l'injection et celles avec la plaque chauffante. La décroissance de la vitesse verticale en $z^{-1/3}$ n'est valide que pour les panaches purs. Or, le panache simulé étant paresseux (voir figure 6(b)), cette expression n'est donc pas valide.

Pour finir, on observe sur les figures 2, 3 et 4 que la convergence en maillage n'a pas été atteinte malgré les simulations avec le maillage C qui ont presque 3.7 millions de mailles. Ce problème soulève la pertinence du code à simuler de tels cas et/ou notre aptitude à l'utiliser. Cependant, il faut garder à l'esprit que les flux sont très sensibles aux faibles variations de vitesse, ce qui rend la convergence en maillage beaucoup plus dure à obtenir. De plus, l'écoulement à la source ayant un nombre de Reynolds intermédiaire (≈ 1400), il semblerait que le code ait du mal à transitionner.

4 Estimation de l'entraînement dans le panache

La différence de l'évolution des flux et de la largeur du panache en fonction de la hauteur laisse présager d'une différence dans l'entraînement d'air frais dans le panache. Dans la théorie classique (voir par exemple [5], ou [2] pour le cas non-Boussinesq), l'entraînement est défini comme le ratio de la vitesse horizontale à la frontière entre la zone turbulente et la zone non turbulente sur la vitesse verticale homogénéisée, $\alpha = \frac{u_c(z)}{W_H(z)}$. Il faut noter que cet entraînement est obtenu à partir de grandeurs homogénéisées et non des grandeurs gaussiennes ($\alpha_G = \frac{\alpha}{\sqrt{2}}$, α_G correspondant à l'entraînement obtenu

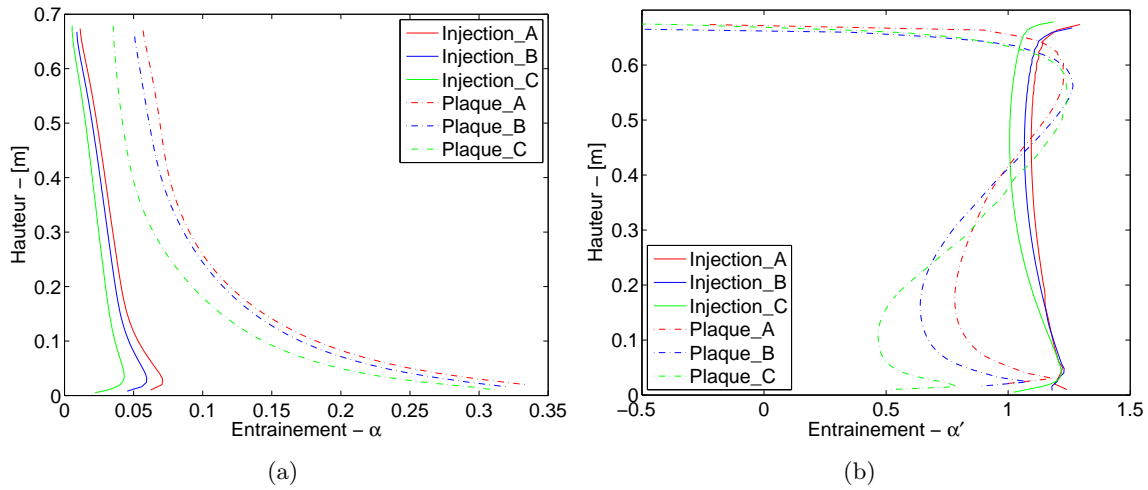


FIGURE 5 – Évolution de l'entraînement (a) α et (b) α' en fonction de la hauteur pour les différentes simulations.

avec des grandeurs gaussiennes). Cependant, cette définition ne peut pas s'appliquer simplement quand on analyse des résultats de simulation numérique, car la définition de la frontière du panache comporte une grande part d'arbitraire. Cette difficulté se trouve d'ailleurs aussi pour la plupart des dispositifs expérimentaux, ce qui pourrait expliquer la grande dispersion des valeurs proposées dans la littérature. C'est pourquoi on préfère ici employer une définition généralisée. Comme explicité dans [3], la forme générale des équations du panache en non-Boussinesq (en négligeant la variation de la chaleur spécifique avec la hauteur, voir [3] pour une discussion de cet aspect) peut s'écrire :

$$\frac{dB}{dz} = 0 \quad , \quad \frac{dG}{dz} = \alpha \times 2\sqrt{\pi}\sqrt{\rho_a M} \quad , \quad \frac{dM}{dz} = \alpha' \times \rho_a \frac{BG}{M} \quad (4)$$

Par la théorie classique du panache, on obtient les mêmes équations sur B et G , et on obtient l'équation sur M avec $\alpha' = 1$. La variation de $\frac{dM}{dz}$ est égale à la poussée d'Archimède. Ainsi, le système d'équations ci-dessus fournit d'une part une définition alternative de l'entraînement α qui ne nécessite pas de déterminer la frontière du panache et d'autre part propose de tester la véracité de l'assertion $\alpha' = 1$, par les définitions :

$$\alpha(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\rho_a \cdot M(z)}} \frac{dG(z)}{dz} \quad , \quad \alpha'(z) = \frac{1}{\rho_a} \frac{M(z)}{B(z) \cdot G(z)} \frac{dM(z)}{dz} \quad (5)$$

La figure 5 donne les entraînements ainsi définis pour les panaches calculés dans les simulations. On observe sur la figure 5(a) que l'entraînement des simulations avec l'injection est compris entre 0.05 et 0.08 en partie basse et diminue avec la hauteur. Les simulations avec la plaque chauffante, quant à elles, ont un entraînement élevé en partie basse et se stabilise à partir de $0.2m$ entre 0.05 et 0.1. L'allure des courbes de la figure 5(a) ressemble beaucoup aux résultats obtenus par [6]. De plus, on observe lorsque $z > 0.5m$ que les α' évoluent fortement. Or, il n'y a pas de raison physique à cela. Ce phénomène met en cause l'emploi des conditions « OPEN » sur les simulations (des simulations sont actuellement en cours afin de tester l'influence des conditions limites).

Il y a plusieurs manières de définir le nombre de Richardson local du panache. On retient ici, pour la hauteur z :

$$\Gamma = \rho_a^{1/2} \cdot G^2 \frac{B}{M^{5/2}} \quad (6)$$

On en déduit, en utilisant les équations sur les flux

$$\frac{d\Gamma}{dz} = \frac{5}{2} \alpha' \frac{\sqrt{\rho_a M}}{G} \cdot \Gamma \times \left(\frac{8\sqrt{\pi}}{5} \frac{\alpha}{\alpha'} - \Gamma \right)$$

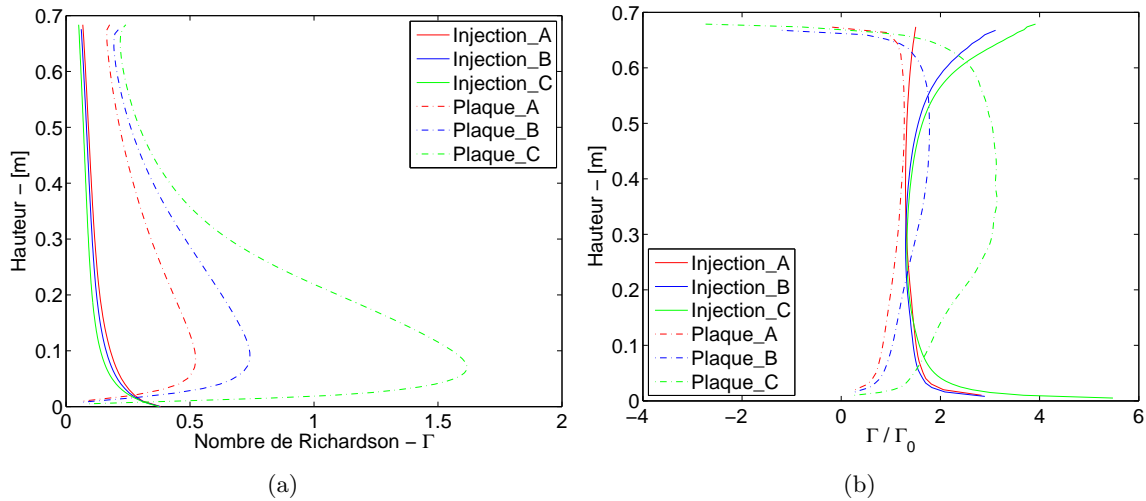


FIGURE 6 – Évolution du (a) nombre de Richardson Γ et du (b) ratio Γ/Γ_0 en fonction de la hauteur z pour les différentes simulations (Γ_0 dépend de z).

Ainsi, le panache pur, pour lequel Γ est indépendant de z , correspond à $\Gamma = \Gamma_0$, avec $\Gamma_0 = \frac{8\sqrt{\pi}}{5} \frac{\alpha}{\alpha'}$ (a priori, on peut avoir Γ_0 qui dépend de z). On peut noter que la définition du nombre de Richardson retenue par [1] correspond à Γ/Γ_0 avec les notations prises ici, pour le cas $\alpha' = 1$. La figure 6 donne, en fonction de z , l'évolution du nombre de Richardson et du ratio Γ/Γ_0 . On peut voir sur la figure 6(b) que Γ est très proche de Γ_0 , ce qui signifie que le panache est pur. Lorsque $\Gamma > \Gamma_0$, le panache est paresseux et lorsque $\Gamma < \Gamma_0$, le panache est forcé.

5 Conclusion

Le présent article a présenté des simulations des grandes échelles de panaches sur un cas réaliste. Les conditions de source analysées ont été d'une part une injection de gaz chaud, et d'autre part une source de chaleur surfacique. L'analyse des résultats a montré que la turbulence ne se développait pas dans le cas de l'injection, alors qu'elle semble réaliste dans le cas de la source de chaleur. Après avoir présenté une nouvelle méthode de calcul de l'entraînement, l'article a permis d'analyser, sur deux types de panaches très différents, les caractéristiques d'entraînement et du nombre de Richardson en fonction de la hauteur. Les prochaines étapes de ce travail consisteront à réaliser des comparaisons avec les résultats expérimentaux de [4] et lancer de nouvelles simulations afin de tester l'influence des conditions aux limites.

Références

- [1] Candelier, F. & Vauquelin, O. 2012 Matched asymptotic solutions for turbulent plumes. *J. Fluid Mech.* **134**
- [2] Carlotti P. & Hunt, G.R. 2005 Analytical solutions for turbulent non-Boussinesq plumes. *J. Fluid Mech.* **538** 343-359
- [3] Carlotti P. 2013 Éléments de mécanique des fluides pour la modélisation des incendies. *Rapport technique du CSTB*, www.cstb.fr
- [4] Ezzamel, A. 2011 Free and confined buoyant flows. *Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon – Imperial College London*.
- [5] Morton, B.R., Taylor, G.I. & Turner, G.S. 1956 Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. Lond.* **234** 1-23
- [6] Pham, M.V., Plourde, F. & Kim, S.D. 2005 Three-dimensional characterization of a pure thermal plume. *J. Heat Transfer* **127**(6) 624-636.